FORFATTERENS VURDERING

Det er forfatterens vurdering, at forskningsresultater, som er publiceret siden [1], i vid udstrækning bekræfter rapportens konklusioner. Menneskets rolle i de klimaændringer, der allerede har fundet sted, synes tilmed yderligere understøttet. Desuden kan fremtidens havniveau-stigninger blive større end estimeret i [1].

I den populærvidenskabelige presse bringes klimaændringernes størrelse og menneskets betydning ofte i tvivl. Det er vigtigt at pointere, at sådanne artikler kun i meget få tilfælde har været baseret på forskning, der har haft kvalitet til publicering i internationale videnskabelige tidsskrifter med *peer review*. Selv om der fortsat er en del usikkerheder, og selv om klimaet har udvist store naturlige variationer, er den grundlæggende dokumentation bag IPCC-rapporternes resultater på plads. Dette gælder på både det teoretiske, det modelleringsmæssige og det observationelle plan.

KORRESPONDANCE: *Eigil Kaas,* Niels Bohr Instituttet, Juliane Maries Vej 30, DK-2100 København Ø. E-mail: kaas@gfy.ku.dk
ANTAGET: 27. juni 2009
INTERESSEKONFLIKTER: Ingen

LITTERATUR
1. IPCC Working Group I Assessment Report 4. 2007. www.ipcc.ch (3. maj 2009)
2. Kaas, E og Langen P. Drivhusgasser og deres betydning for klimaet, Aktuel Naturvidenskab 2007;4:15-19.
3. Meltofte H (Ed.). Klimaændringerne: Menneskehedens hidtil største udfordring. København: Hovedland, 2008
4. Jørgensen AMK og Hansen N. DMI's oversættelse af IPCC's Summary for Policy Makers. 2008 http://www.dmi.dk/dmi/syrspmdkweb.pdf (3. maj 2009).
5. Lockwood M, Fröhlich C. Recent opposite trends in solar climate and the global mean surface air temperature. Proc Soc Roy A 2007;463: 2447-60.
6. Svensmark H, Pedersen JOP, Marsh ND. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions. Proc Roy Soc A 2007;463:385-96.
7. Canadell JG, Le Quéré C, Raupach MR. Contributions to accelerated atmospheric CO2 growth from economic activity, carbon intensity and efficiency of natural sinks. Proc Natl Acad Sci 2007;104:47:18866-70.
8. Keenlyside NS, Latif M, Jungclaus J. Advancing decadal-scale prediction in the North Atlantic sector, Nature 2008;453:84-8.
9. Van Vuuren DP and Riahi K. Do recent emission trends imply higher emissions forever? (Editorial), Climate Change 2008;91:237-48.
10. Allen RJ, Sherwood SC. Warming maximum in the tropical upper troposphere deduced from thermal winds. Nature Geoscience 1, 2008;399–403.
11. Mote TL. Greenland surface melt trends 1973-2007: Evidence of a large increase in 2007. Geophys Res Let 2007;34:L22507.
12. Grindsted A, Moore JC, Jevrejeva S. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200-2100 AD. Clim Dyn 2009. Doi:10.1007/s000382-008-0507-2.
13. Dessler AE, Zhang Z, Yang P. Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations. Geophys Res Lett 2008;35: L20704.

Luftkvalitet og klimaforandringer

Professor Steffen Loft

OVERSIGTSARTIKEL

Københavns Universitet, Det Sundhedsvidenskabelige Fakultet, Institut for Folkesundhedsvidenskab, Afdeling for Miljø og Sundhed

RESUME

Luftkvalitet, sundhed og klimaforandringer hænger tæt sammen. Ozon afhænger af temperaturen og af drivhusgassen metan fra bl.a. kvæg og biomasse. Pollenforekomst afhænger af temperatur og CO_2. Effekten af klimaforandringer på partikulær luftforurening er kompleks, men nettoeffekten er formentlig større sundhedsrisici. Begrænsning af udledning af drivhusgasser ved reduktion af kødproduktion og forbrænding til energiproduktion, transport og opvarmning vil også forbedre luftkvaliteten. Det bør sikres, at energibesparelser i bygninger og brug af CO_2-neutrale brændsler ikke forringer luftkvaliteten inde og ude.

Udledningen af drivhusgasser fra menneskelige aktiviteter forventes at hæve gennemsnitstemperaturen og at øge forekomsten af ekstreme vejrforhold. Disse meteorologiske ændringer vil have potentielt alvorlige konsekvenser for menneskers sundhed, direkte såvel som indirekte [1]. Denne oversigtsartikel fokuserer på danske forhold vedrørende temperatur og luftkvalitet.

Temperaturændringer – især hedebølger – er blevet knyttet til øget sygelighed og dødelighed, specielt relateret til hedeslag, lungesygdomme og kardiovaskulære sygdomme [1-4]. I Danmark har vi dog indtil nu haft ret få egentlige hedebølger, der af Danmarks Meteorologiske Institut defineres som situationer, hvor gennemsnittet af de højeste registrerede temperaturer målt over tre sammenhængende dage overstiger 28 °C, og varmebølger hvor gennemsnittet af de højeste registrerede temperaturer målt over tre sammenhængende dage skal overstige 25 °C. De ni varmebølger, der har været af 3-7 dages længde i 2002-2006, har ikke været associeret med nogen klar øgning i mortalitet af hjerte-kar- og lungesygdomme i dødsårsagsregisteret i Københavnsområdet [5]; men der kan let være mindre tydelige associationer mel-

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.com

lem højere temperatur og dødelighed, som det er fundet i Stockholm [6].

De indirekte virkninger af klimaforandringer knytter sig bl.a. til ændringer i luftkvalitet pga. ændrede kemiske reaktioner samt opblanding og transport af forureningsstoffer i atmosfæren (**Figur 1** og **Figur 2**). Øget temperatur vil ændre atmosfærens kemiske reaktioner og resultere i øget dannelse af ozon og mere toksiske primære forbrændingspartikler fra emissionerne [7, 8]. Faktisk ser det ud til, at en væsentlig del af den dødelighed og sygelighed, som er set under hedebølger i Europa, kan skyldes, at der samtidigt var et øget niveau af ozon og partikler [9]. Samtidig spiller udgangspunktet for dannelse af ozon, ozon i sig selv og forbrændingspartikler også en væsentlig negativ rolle i selve klimaforandringerne ved at virke som drivhusgasser [10].

OZON

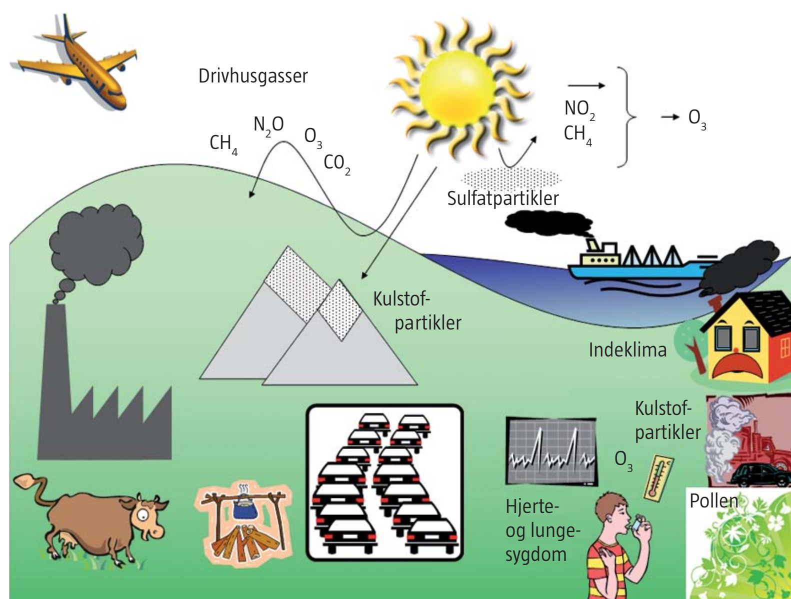
Ozon dannes ud fra flygtige organiske forbindelser og kvælstofoxider i atmosfæren ved kemiske processer, der kræver temperatur og sollys, således at nettoproduktionen i Danmark er beskeden, men det forventes ændret ved klimaforandringer [7, 8]. Metan fra især kvægproduktion, biomasse og kulafbrænding, olie- og gasproduktion og frisætning fra tøende polaregne er hastigt stigende, og metan er den vigtigste organiske forbindelse til ozondannelse, foruden at metan sammen med CO_2 er de vigtigste drivhusgasser [10]. Ozon virker i sig selv også som drivhusgas. I vort nuværende klima bringes ozon mest hertil med vinden sydfra og forbruges af kvælstofoxid fra dieseludstødning, således at niveauet er lavere i byerne end på landet. Ozon er en potent luftvejsirriterende gas, som er associeret med øget sygelighed og dødelighed af især luftvejssygdomme [11, 12]. Mange fremtidsscenarier viser betydeligt stigende ozonniveauer i Nordeuropa – inklusive Danmark – med forventeligt betydende helbredseffekter; men der er usikre forudsætninger, idet risikoen kan modvirkes af forventede reduktioner i emission af de organiske forbindelser og kvælstofoxider, der er udgangspunkt for ozondannelsen, og mulige tærskelværdier for effekterne [7]. Globalt set har ozon store helbredseffekter, og reduktioner i relevante emissioner efter gældende lovgivning og den maksimalt mulige reduktion – især med indsats over for metan – er blevet estimeret til at kunne spare henholdsvis 190.000 og 430.000 liv i 2030, heraf flest i troperne i Afrika og Asien [13].

PARTIKLER

Globalt set vurderes luftforurening at være skyld i 1.600.000 dødsfald pga. indendørs brug af fast brændsel og 800.000 dødsfald som følge af udendørs luftforurening i byer [14]. Disse vurderinger bygger mest på, at langtidseksponering for udendørsniveauer af partikler, især den fine fraktion med en diameter mindre end 2,5 mikrometer ($PM_{2,5}$), har konsistent været associeret med øget dødelighed og sygelighed af hjerte-kar- og lungesygdomme samt lungecancer [15, 16]. Her er eksponeringen typisk defineret som bolig i et område med høje målte niveauer eller nær ved tæt trafik. I mere end 500 tidsseriestudier har man fundet sammenhæng mellem målte stigninger i partikelniveauer og efterfølgende øget dødelighed eller indlæggelser på grund af hjerte-kar- eller lungesygdomme inden for geografisk begrænsede områder [12]. Der er dog stort set ingen af disse studier, der har kunnet skelne mellem betydningen af hver af de mange kilder til partikelforurening. Enkelte studier har omfattet de ultrafine partikler, som er mindre end 100 nanometer, der i byerne overvejende stammer fra dieseludstødning, selv om det antages, at de er farligst pga. høj afsætning i alveolerne, mulighed for at trænge over i kredsløbet, stor overflade og mange toksiske stoffer [17]. Et af de få studier, hvor dette er belyst, er fra København, hvor kildefordeling og størrelsesfordeling af partikler pegede på, at trafik og forbrænding af biomasse har særlig betydning for indlæggelser for lungesygdom, mens jordskorpemateriale var mest knyttet til indlæggelse for hjertesygdom [18, 19]; men sådanne undersøgelser har hidtil overvejende været begrænset til byområder med luftforureningsmålere. Dosis-

FIGUR 1

Kilder til drivhuseffekter og konsekvenser af dem og klimaforandringer i relation til luftkvalitet.



FIGUR 2

Årsager til og konsekvenser af klimaforandringer i relation til luftkvalitet.

Medvirkende til global opvarmning	Dannelse	Effekt af klimaforandringer	Direkte sundhedsskade
Kuldioxid (CO_2)	Forbrænding	Øget frisætning fra bl.a. is og hav	Nej
Metan (CH_4)	Kvægproduktion, biomasse, olie- og gasproduktion	Øget frisætning fra tøende tundra	Nej
Kulstofpartikler	Forbrænding	Mere aggressive partikler	Hjerte-kar-sygdom, lungesygdom, lungecancer
Ozon (O_3)	Fra metan, andre organiske forbindelser fra forbrænding, kvælstofoxider og sollys	Betydelig øget dannelse	Overvejende lungesygdomme
Ikkerelevant		Øget mængde, sæsonlængde og variation i pollen	Mere allergi og allergisymptomer

respons-forholdene viser stor variation både inden for og mellem Europa og USA, hvilket kan skyldes forskelle i kilder, klima, byggetraditioner og brug af aircondition, der påvirker indtrængen af partikler i boligen, og den adfærd, der i øvrigt påvirker eksponering, selv om det ikke har været undersøgt systematisk [11]. Disse faktorer påvirker også effekten af ekstreme temperaturer.

Hovedparten af den partikulære luftforurening stammer fra brug af fossilt brændsel og mange tiltag, der skal reducere CO_2-emissionen herfra, vil også reducere partikelemissionen. Det vil også modvirke, at stigende temperatur fører til, at de primære partikler, ozon og kvælstofoxider reagerer mere med dannelse af mere toksiske partikler til følge. Dog er den omfattende brug af brændefyring til lokal opvarmning, der betragtes som CO_2-netural, den største kilde til den danske partikelemission [15]. Tilsvarende favoriseres dieselbrændstof afgiftsmæssigt i forhold til benzin delvist pga. mindre CO_2-emission pr. kørt kilometer, selv om det medfører væsentligt mere emission af ultrafine partikler og kvælstofoxider, idet filtre og katalysatorteknologi endnu kun dækker en beskeden del af vognparken i Danmark [15]. Man mangler desuden viden om, hvorvidt nye biobrændstoffer, f.eks. biodiesel, er mere eller mindre farlige end fossile brændstoffer mht. forurening [19].

Ændrede vejrforhold med mere højtryksvejr og lette vinde vil føre til, at trafikemission forbliver tæt på kilderne, dvs. i byerne med mange eksponerede. Den overvejende del af partikelforureningen – som er sulfater og nitrater – i luften i Danmark stammer fra emission af svovldioxider og kvælstofdioxider i andre europæiske lande [15]. Ændringer i klimaet med skift i fremherskende vindretninger kan i sig selv ændre dette mønster. Langtransport af emission fra flere skovbrande i et varmere klima vil også bidrage til forværret luftkvalitet.

Nettoresultatet af klimaforandringer på helbredseffekterne af partikler er således vanskelige at forudsige. Det er forventeligt, at partiklerne med stigende temperatur bliver mere toksiske, men til gengæld vil især klimatilpasning med et reduceret fossilt brændselsforbrug formentligt nettoreducere den samlede eksponering. Kulstofpartikler fra forbrænding giver i sig selv et betydeligt bidrag til global opvarmning ved at mørkfarve reflekterende overflader som is og sne (Figur 1). På den anden side virker sulfater, som er sekundære partikler fra udledning af svovldioxid, reflekterende på solens indstråling [10]. En medvirkende årsag til global opvarmning i de sidste 30-40 år kan således være knyttet til et faldende niveau af sulfater i atmosfæren pga. mindre centraliseret kraft-varme-produktion, svovlholdigt brændsel og røgrensning, som til gengæld har haft meget betydelige sundheds- og miljømæssige gevinster.

INDEKLIMA

Energibesparelse med nedsat ventilation reducerer eksponeringen for udendørs luftforurening, når indtrængningen indendørs begrænses. Til gengæld vil nedsat ventilation medføre en forøgelse af luftfugtigheden indendørs, hvilket er en af de vigtigste risikofaktorer for udvikling af allergi og astma, uden at mekanismerne dog er forstået [21, 22]. Nedsat ventilation vil ligeledes øge eksponering for partikler, der dannes indendørs fra forbrænding, madlavning og elektriske installationer, og disse har formentligt også negative helbredseffekter. Således blev den mikrovaskulære funktion målt som amplituden i fingerarterietonus efter iskæmi forbedret hos 41 raske ikkerygere mellem 60 og 75 år efter fjernelse af partikler i deres lejlighed i 48 timer [23].

POLLEN

Forhøjet temperatur og CO_2-koncentration vil øge

produktionen af og sæsonlængden for eksisterende pollen og indføre nye og mere potente allergener som følge af generelle ændringer i vækstbetingelserne. Analyser af pollenmålinger, der startede i Danmark i 1997, viser, at pollensæsonen starter tidligere, næsten seks uger for el og hassel, to uger for elm og birk og en uge for bynke, mens sæsonen for græspollen er uændret [24]. Samtidig er pollenmængderne blevet større for de fleste arter. Ændret klima vil også betyde nye træer og planter og ændret udbredelse af mange arter. Danmark ligger i udkanten af udbredelsesområdet for bynkeambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*), som er stærkt allergifremkaldende. Den kan brede sig til Danmark og føre til flere pollenallergikere. Højere temperaturer og CO_2-niveau i byerne kan medføre højere pollenkoncentrationer, hvor mange er eksponerede. Koncentrationer af pollenallergener kan således vise store tidsmæssig og rumlig variation i byerne på grund af lokale såvel som fjerntliggende kilder, der er afhængige af atmosfærisk transport [25]. Pollen kan også blive mere aggressive efter reaktion med kemiske kvælstofoxider og partikler [26]. På den anden side kan samtidig eksponering for $PM_{2,5}$ eller ozon forstærke reaktioner og sensibilisering over for luftvejsallergener [27].

Mange træarter udsender flygtige kulbrinter, som kan reagere i atmosfæren med dannelse af ultrafine partikler og ozon. Øget temperaturer vil fremme sådanne processer, men helbredseffekter af de ultrafine partikler fra denne biogene kilde er ukendt [15].

SAMMENFATNING

Luftkvalitet, sundhed og klimaforandringer hænger meget tæt sammen. Ozon hænger direkte sammen med temperatur og drivhusgassen metan. Pollenforekomst med deraf følgende allergier er ligeledes direkte forbundet med temperatur og CO_2. For partikulær luftforurening er sammenhængen med klimaforandringer lidt mere kompleks, men nettoeffekten er formentlig større sundhedsrisici også på dette område. Mange tiltag, der sigter mod at reducere udledning af drivhusgasser, vil også have en gunstig virkning på luftkvaliteten. De vigtigste indsatsområder er her at reducere brug af forbrænding til energiproduktion, transport og opvarmning. Den globalt største sundhedsmæssige gevinst med stor reduktion i udledning af drivhusgasser kan opnås ved at udskifte den ineffektive og sundhedsskadelige brug af fast brændsel i åben ild med effektive komfurer og rent brændsel eller endnu bedre med solvarme i den 3. verden. En reduktion i kvægproduktion gennem f.eks. nedsættelse af kødforbruget til de nu anbefalede 80 g pr. dag vil reducere udledningen af metan, som ellers er ved at overhale CO_2 i betydning som drivhusgas, foruden at det vil reducere produktionen af ozon med væsentlige sundhedsgevinster til følge. I sig selv vil et reduceret forbrug af oksekød have væsentlige sundhedsgevinster. Samtidigt er det vigtigt at sikre, at energibesparelser i bygninger ikke fører til et forringet indeklima og at brug af CO_2-neutrale brændsler ikke medfører forværring af luftforureningen.

KORRESPONDANCE: *Steffen Loft,* Institut for Folkesundhedsvidenskab, Afdeling for Miljø og Sundhed, Det Sundhedsvidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet, DK-1014 København K. E-mail: s.loft@pubhealth.ku.dk
ANTAGET: 10. juli 2009
INTERESSEKONFLIKTER: Ingen

LITTERATUR

1. Synthesis report from climate change. Global Risks, Challenges & Decisions, Copenhagen 2009. København: Københavns Universitet, 2009.
2. Le TA, Lefranc A, Eilstein D et al. Impact of the 2003 heat wave on all-cause mortality in 9 French cities. Epidemiology 2006;17:75-9.
3. Baccini M, Biggeri A, Accetta G et al. Heat effects on mortality in 15 European cities. Epidemiology 2008;19:711-9.
4. Michelozzi P, Accetta G, De SM et al. High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities. Am J Respir Crit Care Med 2009;179:383-9.
5. Wichmann J, Andersen ZJ, Ketzel M et al. Vulnerability to heat-related mortality in Greater Copenhagen, Denmark: a case-crossover analysis. København: Sundhedsstyrelsen, 2009.
6. Rocklov J, Forsberg B. The effect of temperature on mortality in Stockholm 1998-2003: a study of lag structures and heatwave effects. Scand J Public Health 2008;36:516-23.
7. Ebi KL, McGregor G. Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts. Environ Health Perspect 2008;116:1449-55.
8. Kinney PL. Climate change, air quality, and human health. A J Prev Med 2008;35:459-67.
9. Filleul L, Cassadou S, Medina S et al. The relation between temperature, ozone, and mortality in nine French cities during the heat wave of 2003. Environ Health Perspect 2006;114:1344-7.
10. Solomon S, Quin M, Manning M et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
11. Jerrett M, Burnett RT, Pope CA III et al. Long-term ozone exposure and mortality. N Engl J Med 2009,360:1085-95.
12. Anderson HR, Atkinson RW, Peacock JL et al. Meta-analysis of time-series studies and panel studies of particulate matter (PM) and Ozone (O_3) Report of a WHO task group. København: WHO Regional Office for Europe, 2004.
13. West JJ, Szopa S, Hauglustaine DA. Human mortality effects of future concentrations of tropospheric ozone. Comptes Rendus Geoscience 2007;339:775-83.
14. WHO. The world health report 2002 – Reducing risks, promoting healthy life. Geneve, Schweiz: WHO International, 2002
15. Christensen J, Ellermann T, Hertel O et al. Luftforurening med partikler – et sundhedsproblem. Højbjerg: Forlaget Hovedland, 2009
16. Pope CA III, Burnett RT, Thun MJ et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. JAMA 2002; 287:1132-41.
17. Vrang ML, Hertel O, Palmgren F et al. Helbredseffekter af trafikgenererede ultrafine partikler. Ugeskr Læger 2002;164,3937-41.
18. Andersen ZJ, Wåhlin P, Raaschou-Nielsen O et al. Ambient particle source apportionment and daily hospital admissions among children and elderly in Copenhagen. J Expo Sci Environ Epidemiol 2007;17:625-36.
19. Andersen ZJ, Wåhlin P, Raaschou-Nielsen O et al. Size distribution and total number concentration of ultrafine and accumulation mode particles and hospital admissions in children and the elderly in Copenhagen, Denmark. Occup Environ Med 2008;65:458-66.
20. Swanson KJ, Madden MC, Ghio AJ. Biodiesel exhaust: the need for health effects research. Environ Health Perspect 2007;115:496-9.
21. Fisk WJ, Lei-Gomez Q, Mendell MJ. Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes. Indoor Air 2007;17: 284-96.
22. Fisk WJ, Mirer AG, Mendell MJ. Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates. Indoor Air 2009;19:159-65.
23. Bräuner EV, Forchhammer L, Møller P et al. Indoor particles affect vascular function in the aged: an air filtration-based intervention study. Am J Respir Crit Care Med 2008;177:419-25.
24. www.dmi.dk(29. maj 2009).
25. Skjøth CA, Sommer J, Brandt J et al. Copenhagen – a significant source of birch (Betula) pollen? Int J Biometeorol 2008;52:453-62.
26. Franze T, Weller MG, Niessner R et al. Protein nitration by polluted air. Environ Sci Tech 2005;39:1673-8.
27. Gilliland FD, Li YF, Saxon A et al. Effect of glutathione-S-transferase M1 and P1 genotypes on xenobiotic enhancement of allergic responses: randomised, placebo-controlled crossover study. Lancet 2004;363:119-25.